

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.4.199>

IIBC 2015-4-25

고전력 케이블의 잔여 수명 예측을 위한 부하 전류 및 온도 연구

A Study on Load Current and Temperature to Expect Lifetime of High-Power Cables

엄기홍*, 이관우**

Kee-Hong Um*, Kwan-Woo Lee**

요 약 산업의 발전과 더불어 전력에 대한 수요량이 증가하고 있다. 이에 따라 전기의 생산 및 송전 용량이 커지고 시설이 대규모화될 뿐만 아니라 높은 신뢰성으로써 동작할 것을 요구받고 있다. 전기의 생산 및 공급 과정에서 요구되는 높은 신뢰성은 산업 사회의 필수적인 요소라고 할 수 있다. 설비의 사고 및 정전 사고 등은 높은 전기적 의존을 가진 고도 산업 사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 가져다준다. 이 논문에서 운전 중 케이블의 부하 전류와 수명과의 상관 관계에 대한 기초 연구를 제시한다. 본 연구를 위하여, 절연 저항과 부하 전류를 측정하기 위한 CT와 온도 측정 장치를 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템에 설치하였다. 측정 장치는 동작한지 약 20년이 경과한 케이블 시스템에 설치·운영 중이다. 대부분 케이블의 절연 저항은 한계 이상의 값을 나타내었으므로, 잔여 케이블 수명을 발견하기 어려웠으며, 부하 전류는 거의 변동이 없는 시스템이었다. 주변 온도는 15~25℃로서 변동폭은 매우 적었다.

Abstract With the development of industry these days, the demand for electric power increases and the larger capacity for power transfer is required. The scales of facilities should become larger; and the relative systems are required to operate with a higher degree of reliability. Therefore, stabilization of electric power systems is an important issue. The high degree of reliability required in the process of production and supply of electric power is an essential part of industrial society. Accident such as blackouts causes a hugh amount of economic losses to the high-tech industrial society dependent upon electric power. This paper is about the basic study of the relations between the load current and lifetime of power cables in operation. In order to do the research, we installed a current transformer and an equipment for measuring temperature at the 6.6. kV cables in operation. The two equipments have been installed on the cable systems in operation for the last 20 years. Since the insulation resistance of most of the cables showed the value larger than the threshold, it was not easy to tell the remaining lifetime of cables. The load current of the cables was almost constant. The surrounding temperature was 15~25℃, little variation of temperature values.

Key Words : XLPE, Insulation Resistance, Megger, Arrhenius, Thermal Resistance

*정회원, 한세대학교 IT학부(주저자)

**정회원, 오성메가파워 R&D 소장(교신저자)

접수일자 2015년 7월 22일, 수정완료 2015년 8월 7일

계재확정일자 2015년 8월 7일

Received: 22 July, 2015 / Revised: 7 August, 2015 /

Accepted: 7 August, 2015

**Corresponding Author: gyu9177@daum.net

School of IT, Hansei University, Korea

I. 서 론

산업 사회에서 필요한 전력을 공급하기 위하여 신뢰성 및 안정성을 기초로 하여 전기를 생산 및 공급하여야 한다. 국내에서 생산하는 전기 에너지는 화력 및 원자력에 발전에 대부분 의존하며, 공급량에 비하여 매년 7% 이상의 수요가 증가하는 추세이므로 전력 여유율이 감소함으로 인한 발전 시설이 부족하다. 효율적인 에너지의 활용을 위하여 전기 에너지를 절약할 필요성이 제기되고 있다^[1].

발전소에서 전기 에너지를 생산 및 전달을 함에 있어서 기존 시설의 동작 및 운영의 효율성을 높여야 하고, 전력 전송을 하기 위하여 사용하는 고전력 케이블은 전력 사고를 사전에 방지하기 위하여 신뢰성 있게 동작을 하여야 한다. 가교 폴리에틸렌 (XLPE) 절연 케이블은 전기적으로 우수한 절연 내력 및 절연 특성을 갖는다는 등의 여러 가지 장점이 있어서 전력 케이블로서 거의 유일하게 사용되고 있다^[2]. 전력 케이블이 안정 상태에서 동작하면서 고품질의 전기를 지속적으로 공급할 수 있기 위해서는, 케이블을 제조하는 기술이 우수해야 할 뿐만 아니라 설치 후 장기간에 걸쳐 신뢰성을 바탕으로 동작해야 한다는 보장이 있어야만 한다. 철저한 유지, 보수 및 관리를 함으로써 여러 가지 부정적 요인에 의하여 초래되는 케이블 열화에 의한 불의의 사고가 발생하기 전에 고장 시점을 사전에 과학적으로 예측하여 예방하여야 한다. 부하 전류가 흐르는 케이블 시스템에서는 열이 발생하여 열화 촉진의 주요 원인이 되고 있으나, 부하 전류에 의한 열화 현상이 케이블의 수명에 어떤 영향을 미치는지를 확인할 수 있는 방법은 현재로서는 없는 실정이다. 우리가 연구한 케이블은 기중 포설되어 있으며 허용 전류 555(A)를 갖고 있는 케이블이다. 실제 케이블에 흐르고 있는 전류는 40(A) 정도이다. 그러므로 케이블 시스템의 잔여 수명은 측정할 수 있는 한계값 보다 작은 값을 나타내어서는 안된다. 실제 측정된 절연 저항 측정 값은 기준 한계치 보다 훨씬 큰 값을 나타내었으며, 케이블이 설치된 지 약 20 년이 경과 하였으나, 잔여 수명을 확인할 수 있을 정도의 측정값을 나타내지 않음을 확인할 수 있었다. 우리는 이 연구에서 케이블의 부하 전류에 의한 절연 저항의 변화의 상관 관계를 분석함으로써 케이블 시스템의 잔여 수명을 과학적으로 예측하고자 한다.

II. 절연 저항 및 허용 전류

1. 절연 저항

직류 전압을 절연체 양단에 인가했을 때, 절연체를 통하여 미소한 전류가 흐르게 된다. 이 경우 인가 전압과 전류의 비(ratio)를 절연 저항(insulation resistance, IR)이라 한다^[3].

직류 전압을 인가한 후 동작 시간이 경과하여 정상 상태의 운전을 하고 있는 동안에도 전류가 전하를 흡장(occlusion, 吸藏)하는 성질을 나타낼 것이고, 이 경우 온도, 습도, 흡수 속도 등에 따라 절연 저항이 영향을 받는 양상이 다르다. 절연된 도체의 사이에 삽입되어 있는 저항 절연 물체에 전압을 인가했을 경우에는, 표면과 내부에 흐르는 누설 전류에 의하여 전압과 전류의 비를 절연 저항이라 하고, 다음과 같이 전압에 따라 구별된 따라 메거(megger)를 사용하여 측정한다^[4].

- (1) 특별 고압 회로 : 2,000 V Megger
- (2) 고압 회로 : 1,000 V Megger
- (3) 저압 회로 : 500 V Megger

이렇게 측정하는 절연 저항은 온도, 습도, 기기의 표면 상태, 인가 전압 및 인가 시간 등에 따라 변화하기 때문에 일반적으로 아래와 같은 개략적인 값을 기준으로 판정하고 있다^[4,5].

- (1) 변압기류 : 100 MΩ 이상
- (2) Condenser 류 : 1,000 MΩ 이상
- (3) Cable 류 : 150 MΩ 이상
- (4) 회전기류 : 정격전압. 정격출력 KW 또는 KVA+1,000 MΩ 이상

절연 저항은 전력 케이블의 절연에 의한 열화 현상을 판단하기 위하여 사용하는 물리량이기 때문에, 값이 감소하면 누전이나 화재 등의 위험 상황이 발생할 수 있다. 절연체의 표면을 따라서 흐르는 전류를 표면 절연 저항(surface insulation resistance), 내부를 흐르는 전류를 체적 절연 저항(volume insulation resistance)이라고 한다. 절연 상태가 유지되고 있다고 하더라도, 고전압이 인가되거나 사용되는 절연 물질에 의한 불규칙적인 특성을 나타낼 경우 케이블의 절연 저항 또한 주변 환경의 영향

을 많이 받아서 불규칙적으로 변화하게 된다^[6].

여러 가지 요인에 의하여 매우 복잡한 특성을 나타내는 절연 저항을 표현하기가 쉽지 않으므로 열화 판단을 위한 하나의 참고 자료로서만 사용되었다. 값이 작은 절연 저항은 쉽게 측정할 수 있으나, 고압 전원에 의한 절연 저항은 측정하기가 매우 어렵다는 이유로 지금까지 측정 실시된 적이 없었으나, 저자들은 이 값을 분석하여 데이터로 작성하였다. 운전 중인 고전압 케이블 시스템에서 얻어 낸 절연 저항 데이터는 매우 불규칙하므로 이 데이터의 의한 절연 저항 특성을 쉽게 파악할 수가 없었다. 그러나, 불규칙한 결과를 초래하는 잡음의 원인이 되는 요소를 제거함으로써, 절연 저항은 시간에 따라 감소된다는 일반적으로 추론이 가능한 특성을 정량적으로 확인함으로써 일정한 규칙성을 나타냄을 증명할 수 있었다. 초기의 열화 곡선은 랜덤 열화(random deterioration) 즉 불규칙적인 열화 곡선인 아레니우스(Arrhenius) 열화 특성을 나타냄을 확인하였고, 열열화(heat deterioration)가 끝나는 시점에서는 전압 열화(voltage deterioration) 특성을 나타냄을 확인하였다^[7]. 전압 열화 곡선 이론은 케이블 시스템의 고장 특성을 파악하기 위해 가장 널리 사용되고 있다.

2. 허용 전류

전력 케이블에 전류가 흐르면 열이 발생하게 된다. 케이블의 절연체 종류에 따라, 전류가 규정되는 데, 이를 허용 전류 (allowable current, current carrying capacity, ampacity; 許容電流)라 한다. 전선의 단면적에 안정하게 흐를 수 있는 전류의 한도이다. 전선 주위의 환경에 따라 보정을 할 경우 동일한 전선이라고 하더라도 허용 전류의 값은 달라진다. 예를 들어, 단심형 XLPE 절연 전선 (CV 케이블)을 삼각 배열하여 사다리형 트레이 공사를 하는 경우의 허용 전류를 계산하면 도체의 허용 전류는 90°C , 주위 온도는 30°C 이다^[8,9]. 케이블 도체에 전류가 흐르면 도체, 절연체, 금속 차폐층 등에서 열이 발생한다. 이 열은 케이블 내부에서 밖으로 빠져나가며 전체적으로 안정된 균형을 이루게 된다. 케이블 내부에서 발생한 열은 절연체, 피복, 토양 등을 통과하며 발산되는데 열이 발산하는 정도의 재료에 따라 각각 다르게 된다. 이때 열의 전달되는 정도를 열저항(thermal resistance)이라는 개념으로 표현한다. 즉 열저항이 크다는 것은 열이 잘 빠져나가지 않는다는 의미이다. 허용 전류는 상시 허용 전

류 및 과도시 허용 전류로 구분된다. 상시 허용 전류는 케이블 수명 기간 중 전류를 계속 흘려도 케이블에 이상이 없는 전류를 말하며 과도시 허용 전류는 단시간 동안 필요에 의하여 상시 허용 전류 보다 많이 흘렸을 경우 케이블에 이상이 없는 전류를 말한다.

III. 도체 온도 및 표면 온도 변환 시스템

그림 1은 케이블의 도체 온도 및 표면 온도를 측정하기 위하여 우리들이 개발하여 설치 운영 중인 시스템의 외관이다. 우리들의 연구실에 설치되어 있다. 이 장치를 사용하여 측정하려는 도체에 부하 전류가 흐르면 발열이 되는데, 열저항 때문에 도체 온도와 표면 온도가 차이가 발생하게 된다. 원리는 발전소의 부하 전류 만큼 측정 장치에서 전류를 발생시켜 흐르게 되면, 케이블로 루프를 만들어 도체 단자를 통하여 전류 순환 루프를 만든다. 그러면, 도체 내에 전류가 흐른다. 이 때 도체 온도와 표면 온도를 측정하게 되면, 도체 온도와 표면 온도의 상관 관계를 알 수 있다. 단, 상관 관계를 알기 위해서는 발전소 내의 온도와 실험실 내의 온도 변화를 동일한 조건으로 설정하여야 한다. 고전압 케이블의 전류 및 온도는 측정 장치에 연결되어 있는 화면을 통하여 확인할 수 있으며, 이로써 도체 온도와 부하 전류와의 상관 관계를 특정할 수 있다. 동작 중인 고전력 케이블의 도체의 온도를 측정하는 작업은 거의 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위하여 케이블의 표면에서의 온도를 측정하고 도체의 온도로 변환하기 한 장치를 그림 1.(b)에 나타내었다. 우리는 이 장치를 (주)한국서부발전 내부에 설치하여 운전하고 있다.



그림 1. (a) 온도측정장치의 외관, (b)표면온도 변환장치
Fig. 1. (a) Appearance of equipment for measuring temperature (b) Equipment for converting surface temperatures

IV. 절연 저항, 부하 전류 및 표면 온도의 변화

1. 절연 저항의 변화

그림 2는 설치 후 200일 동안 동작하고 있는 케이블의 절연 저항이 변화하는 형태를 보여준다. 설치 후 20년 지난 활선 케이블의 절연 저항은 상한치인 30 Gohm을 초과하여, 6개월 경과한 후 100 Gohm으로 상향 조절하였다. 기간 1년 동안의 데이터를 측정된 결과, 케이블 시스템의 잔여 수명은 상한 한계치 이상으로 남아 있었다.

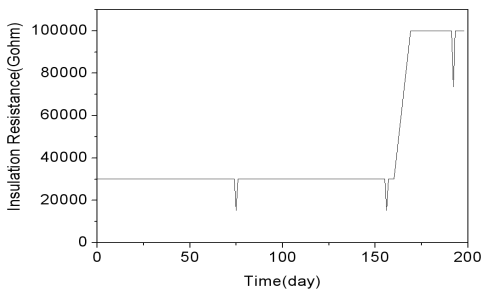


그림 2. 시간에 따르는 절연 저항의 변화
Fig. 2. Changing trend of insulation resistance vs. time

2. 부하 전류 및 표면 온도의 변화

그림 3과 4는 같은 기간 동안에 측정된 부하 전류와 온도의 변화를 보여준다. 부하 전류는 약 150 일이 되기 전까지는 35 ~ 40° A 로써 변화가 거의 없었다. 150-160 일 사이에는 급격하게 감소하여 전류가 흐르지 않다가 160일이 지나면 다시 35 ~ 40° A 로 회복됨을 확인 할 수 있다.

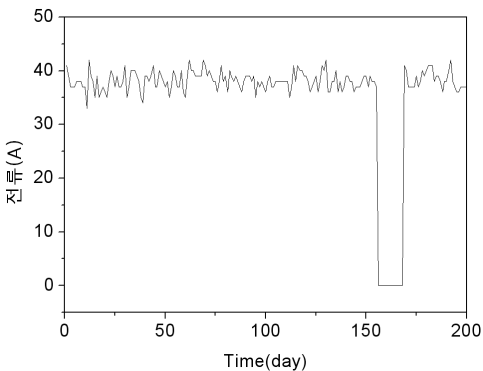


그림 3. 시간에 따르는 부하 전류
Fig. 3. Load current vs. time

케이블 시스템의 표면 온도는 약 150 일이 되기 전까지는 17 ~ 27° C의 범위에서 변화를 보였다. 약 150-160 일 사이에는 다소 감소한 전류가 흐르다가 160일이 지나면 다시 22 ~ 27° A 로 회복됨을 확인 할 수 있다.

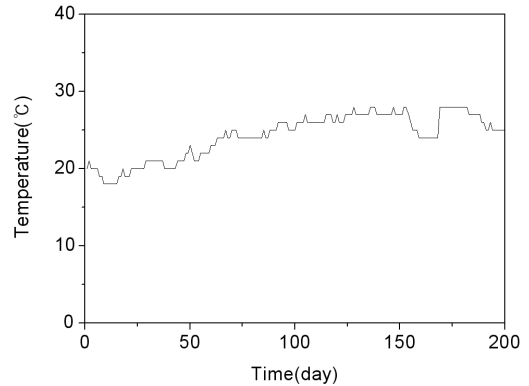


그림 4. 시간에 따르는 표면 온도
Fig. 4. Surface temperature vs. time

그림 3 과 4는 측정 장치에서 얻은 그래프로서 필터링 (filtering) 과정을 거치기 전에 케이블의 부하 전류와 표면 온도가 변동하는 양상을 보여 주고 있다. 필터링 과정은 고도의 경험과 기술을 요한다. 필터링하는 과정과 결과에 대해서는 추후의 논문에서 제시하기로 한다.

V. 결론

우리는 이 논문에서 발전소에서 설치 한 후 20 여 년 동안 운전하고 있는 6.6 kV 활선 케이블의 동작 특성을 나타내는 절연 저항을 데이터를 측정하고 해석하였다. 절연 저항값이 여전히 큰 값을 유지 하고 있었으므로, 동작을 신뢰할 수가 있다. 이 결과를 해석하면 향후 6.6 kV 활선 케이블의 잔여 수명을 평가하는데 에 크게 기여할 것으로 예상된다.

References

- [1] J. S. Lee, "Design and Structural Analysis of Electric Saver Box," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Vol. 13,

No. 6 pp. 2435-2440, 2012.

- [2] K. W. Lee, Um, K. J. Lee, "A Study on the Deterioration Process of 22kV High-voltage Cables and Evaluating the Remaining Life of Cables in Operation", Fall Conference, KIEE, 2012.
- [3] A. O. Desjarlais, "Which Kind Of Insulation Is Best?". Oak Ridge National Laboratory, May 5, 2013.
- [4] S. B. Choi, Industrial safety great dictionary, Gold. 2004. May, 2004.
- [5] K. S. Kim, "Diagnosis of Insulation Resistance in Stand-by Motor by Moisture", MS Dissertation in Electronics and Electrical; engineering, Graduate School of Industrial Enngineering, Pusan National University Feb., 2013. 2
- [6] F. J. Wyant, S. P. Nowlen, "Cable Insulation Resistance Measurements Made During Cable Fire Tests" Sandia National Laboratories, June 2002.
- [7] K. H. Um, K. W. Lee, "A Study on Cable Lifetime Evaluation Based on Characteristic Analysis of Insulation Resistance by Acceleration Factor of the Arrhenius Equation", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.14, no. 5, pp. 231-236, Oct., 2014.
- [8] K. W. Lee, B. K. Kim. Y. S. Mok, K. H. Um, K. J. Lee, D. H. Park, "A Study on the Deterioration Process of 22kV High-voltage Cables and Evaluating the Remaining Life of Cables in Operation", Fall Conference, KIEE, 2012.
- [9] H. S. Shin, Y. S. Kim, H. J. Jeong, S. K. Ahn, "Calculating Method of Current Carrying Capacity of Power Cabled Based on the Series of KS C IEC60364", pp. 427-437, Nov. 2005, The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers
- [10] K. W. Lee, K. H. Um, D. H. Park., "Test Operation of Equipment for Evaluating the Relationship Between Load Current and Lifetime of 6.6kV Cable in Operation." 2014 Summer Conference, KIEE, Yongpyung, Korea.

저자 소개

엄 기 홍(정회원)



학력

- BS: 한양대학교 전자공학과
- MS: Dept. of Electrical & Computer Engineering, Polytechnic Institute of Engineering, NYU (New York University), New York, USA
- Ph.D: Dept. of Electrical & Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology (NJIT), New Jersey, USA

경력

- TA, RA, and Lecturer at NJIT (New Jersey, USA)
 - Researcher at RS Microwave Company Inc. (New Jersey, USA)
 - Researcher at Physics Department, Princeton University (New Jersey, USA)
 - Adjunct Professor at NJIT (New Jersey, USA)
 - 강남대, 상명대, 한양대 강사
 - 현재 한세대학교 IT 학부 교수
- <주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>

이 관 우(정회원)



학력

- 학사: 한양대학교 전기공학과
- 석사: 원광대학교 전자재료공학부
- 박사: 원광대학교 전자재료공학부

경력

- LG 전선 연구소
 - 일진 전선 연구소
 - 호원대학교 전기전자재료공학부 겸임교수
 - 원광대학교 외래 교수
 - 현재 (주)오성메가파워 연구소장
- <주관심분야 : 전기전자재료>